

極端に厳しい地山条件におけるトンネル切羽安定性の評価

山口大学大学院理工学研究科 学生会員 ○佐々木 亨  
 山口大学大学院理工学研究科 正会員 森本 真吾  
 山口大学大学院理工学研究科 正会員 進士 正人

1. はじめに

トンネル施工時において、切羽の安定性の確保は工事の安全性や経済性にとって極めて重要な課題である。しかし、切羽の自立性が乏しい軟弱地盤では切羽安定性の評価や予測は困難であり、現状では施工経験者の現場判断にゆだねられている。これによって実際に切羽崩壊で人命にかかわる事故も発生している。

そのため森本ら<sup>1)</sup>は、地山特性の違いによる挙動の特徴を定量的に理解・把握する必要があると考え、これを3次元数値解析において極めて強度の小さい地山のトンネル掘削を再現した。また、櫻井ら<sup>2)</sup>は限界せん断ひずみによるトンネル安定性の評価を提案し、林ら<sup>3)</sup>は限界せん断ひずみによって切羽の安定性評価を行った。

本研究では、土被りを変化させた3次元数値解析の結果を用いて、切羽の安定性評価を行い、各物性値における許容土被りの高さを検討した。なお、評価手法は限界せん断ひずみ<sup>2)</sup>を切羽安定性の指標に用いた。

2. 対象とした軟弱地盤のモデル化と解析手順

2-1. 解析物性値の設定

既往研究<sup>1)</sup>を参考に、地山等級DIIの物性値を基準としてcとφを低下させ、その組み合わせにより切羽の自立性が問題となるような軟弱地山を表現した。解析で用いた物性値を表-1に、cとφの物性値図に過去の文献や実験データより得られた物性条件を当てはめたものを図-1に示す。また、与条件から算出される各ケースにおける限界せん断ひずみの値を表-2に示す。

2-2. 解析モデル

本研究で用いる解析モデルを図-2に示す。地山の構成則は等方弾塑性体とし、合成支保工およびインバートは等方弾性体とした。土被りは15m、40m、100mの3パターンを想定し、重力(100mの場合は重力及び土被り荷重)を加え、静水圧状態とした。

境界条件は、土被り15mおよび40mは上方のみ開放

表-1 解析物性値

	単位	弾性係数	ポアソン比	粘着力	内部摩擦角
	体積重量				
	γ (kgf/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	μ	c (MPa)	φ (°)
地山	2100	150	0.35	0.001~0.2	0~30
合成支保工	2509	8134	0.20		
インバート	2400	22000	0.20		

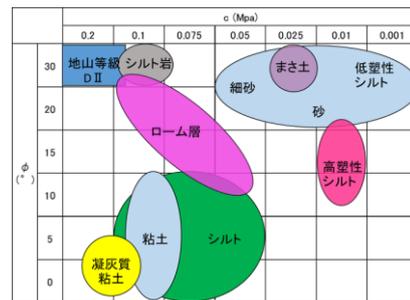


図-1 地質分布概要図

表-2 各ケースの限界せん断ひずみ

限界せん断ひずみ	φ (°)	c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
φ (°)	30	5.671	7.323	8.144	9.458	12.214	17.128	40.060
	25	5.880	7.594	8.445	9.808	12.666	17.762	41.542
	20	6.089	7.864	8.745	10.156	13.116	18.392	43.016
	15	6.298	8.134	9.045	10.505	13.566	19.024	44.494
	10	6.510	8.407	9.348	10.857	14.021	19.662	45.987
	5	6.725	8.684	9.657	11.216	14.484	20.311	47.505
	0	6.945	8.969	9.973	11.583	14.959	20.977	49.062

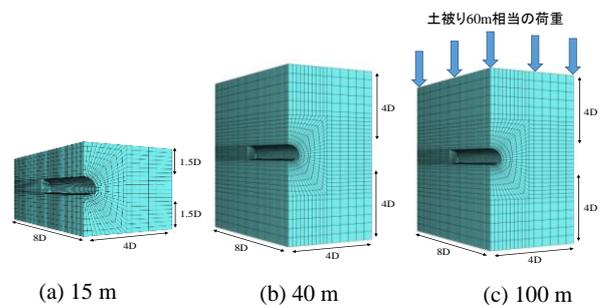


図-2 解析モデル

し、100mの場合は全面拘束とした。また、トンネル断面の対称性を考慮し、モデルは半断面とした。

2-3. 解析手順

掘削手順は重力解析後、境界から中央までの4D間を一括掘削し、直後に切羽後方1mまでインバートを含めた支保工を設置し、解が収束するまで計算を行った。その後、切羽面の最大せん断ひずみの平均値が限

キーワード 切羽 安定性 許容土被り 限界せん断ひずみ トンネル 3次元数値解析

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号 山口大学工学部 社会建設工学科 進士研究室

TEL 0836-85-9332

界せん断ひずみの値を超えていれば不安定，超えていなければ安定として評価を行った．解が発散したケースについては切羽が極めて不安定であり，崩壊したとみなした．

### 3. 解析結果と考察

土被りの違いによる切羽安定性を評価・比較するために，土被り高さごとの各ケースの最大せん断ひずみの平均値と安定性判定結果を表-3に示す．表中の赤字は不安定と判定できるケースを示し，解が発散し崩壊したとみなせるものは×で示している．表-3より土被りが大きくなるにつれて切羽が不安定化し，崩壊とみなすことのできるケースが増えていることがわかる．

次に，土被りの変化による切羽の最大せん断ひずみの推移から各ケースの許容できる土被り高さを検討する．図-3に $\phi=30^\circ$ のときの最大せん断ひずみと土被りの関係を示す．図-3の赤線は安定領域と不安定領域の境界線であり，この線と交わる点を各ケースにおける許容土被りと定義した． $\phi=10^\circ\sim 25^\circ$ のケースについても同様に，全ケースの土被りの許容値を求めた．しかし， $0^\circ$ および $5^\circ$ のケースは安定したケースが少ないため，今回は対象外とした．

この境界線から得られた各ケースの土被りを表-4に示す．ここで得られた各ケースの値は表-3に示した数値解析を行った際の切羽安定性評価の結果とほぼ一致している．しかし， $c=0.01\text{MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ のような砂質系地山では必ずしも一致しなかった．

次に，この許容土被り高さと同図-1に示す地質分布概要図を関連づけると，粘着力 $c$ が小さく内部摩擦角 $\phi$ が大きい砂質土系地山に分類されるケースは，粘着力 $c$ が大きく内部摩擦角 $\phi$ が小さい粘性土系地山に分類されるケースに比べて全体的に許容土被りが大きい値を示していることがわかる．このことから粘性土系地山における切羽の安定性は砂質土系地山に比べ低いと考えられる．しかし，低塑性シルトである $c=0.01\text{MPa}$ ， $\phi=30^\circ$ のケースでは粘性土系地山とほぼ同程度の安定性となっている．

### 4. 結論

今回の結果から軟弱地盤の許容土被り高さを凡そ把握することができた．また，砂質土系地山は粘性土系地山と比較して概ね安定性が高いが，粘着力が小さいケースでは同程度であることが分かった．

表-3 最大せん断ひずみと判定結果

(a) 土被り 15m

		c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
$\phi$ ( $^\circ$ )	30	0.21	0.22	0.24	0.30	0.48	28.34	×
	25	0.21	0.24	0.28	0.36	0.63	95.54	×
	20	0.21	0.27	0.32	0.45	1.02	×	×
	15	0.22	0.31	0.39	0.59	2.50	×	×
	10	0.23	0.36	0.50	0.92	×	×	×
	5	0.25	0.47	0.75	1.99	×	×	×
	0	0.28	0.71	1.56	8.84	×	×	×

(b) 土被り 40m

		c (MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
$\phi$ ( $^\circ$ )	30	0.53	0.77	0.93	1.19	2.06	67.33	×
	25	0.60	0.94	1.15	1.60	3.37	88.36	×
	20	0.68	1.16	1.54	2.38	6.80	×	×
	15	0.79	1.61	2.32	4.35	27.17	×	×
	10	0.96	2.58	4.53	12.20	×	×	×
	5	1.31	6.02	15.56	265.68	×	×	×
	0	2.14	34.03	×	×	×	×	×

(c) 土被り 100m

		c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
$\phi$ ( $^\circ$ )	30	1.98	3.06	3.76	5.21	9.81	109.50	×
	25	2.42	4.26	5.55	8.12	16.98	×	×
	20	3.11	6.50	9.05	15.15	41.70	×	×
	15	4.53	12.30	20.20	40.52	×	×	×
	10	7.88	37.00	75.78	235.00	×	×	×
	5	21.96	254.00	690.00	1758.00	×	×	×
	0	159.89	2103.00	3429.00	×	×	×	×

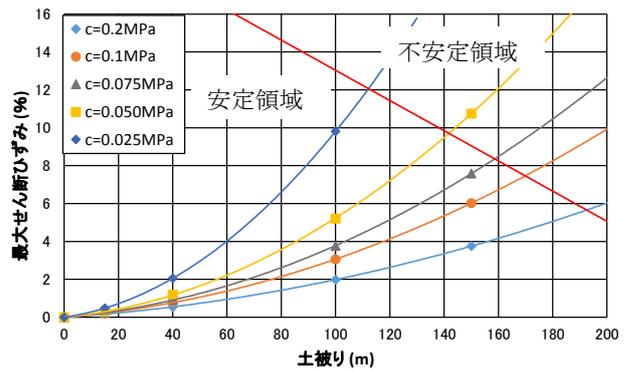


図-3 土被りと最大せん断ひずみの関係

表-4 各ケースにおける土被りの許容値

		c(MPa)						
		0.2	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01	0.001
$\phi$ ( $^\circ$ )	30	190	165	155	140	110	45	×
	25	170	135	125	110	85	10	×
	20	145	110	95	80	55	×	×
	15	115	80	65	60	25	×	×
	10	90	70	55	35	×	×	×

### 参考文献

- 1) 森本真吾，進士正人，中川浩二：地山と特性の違いによるトンネル切羽挙動の把握，第58回土木学会年次学術講演会，III-037，pp. 73-74，2003.3.9
- 2) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No493/III-27，pp. 185-188，1994.
- 3) 林久資，青木一男，吉岡尚也：核残しを併用したときの押し出し性地山におけるトンネル周辺挙動，土木学会論文集 F1 特集号，No.1，pp.17~27,2010